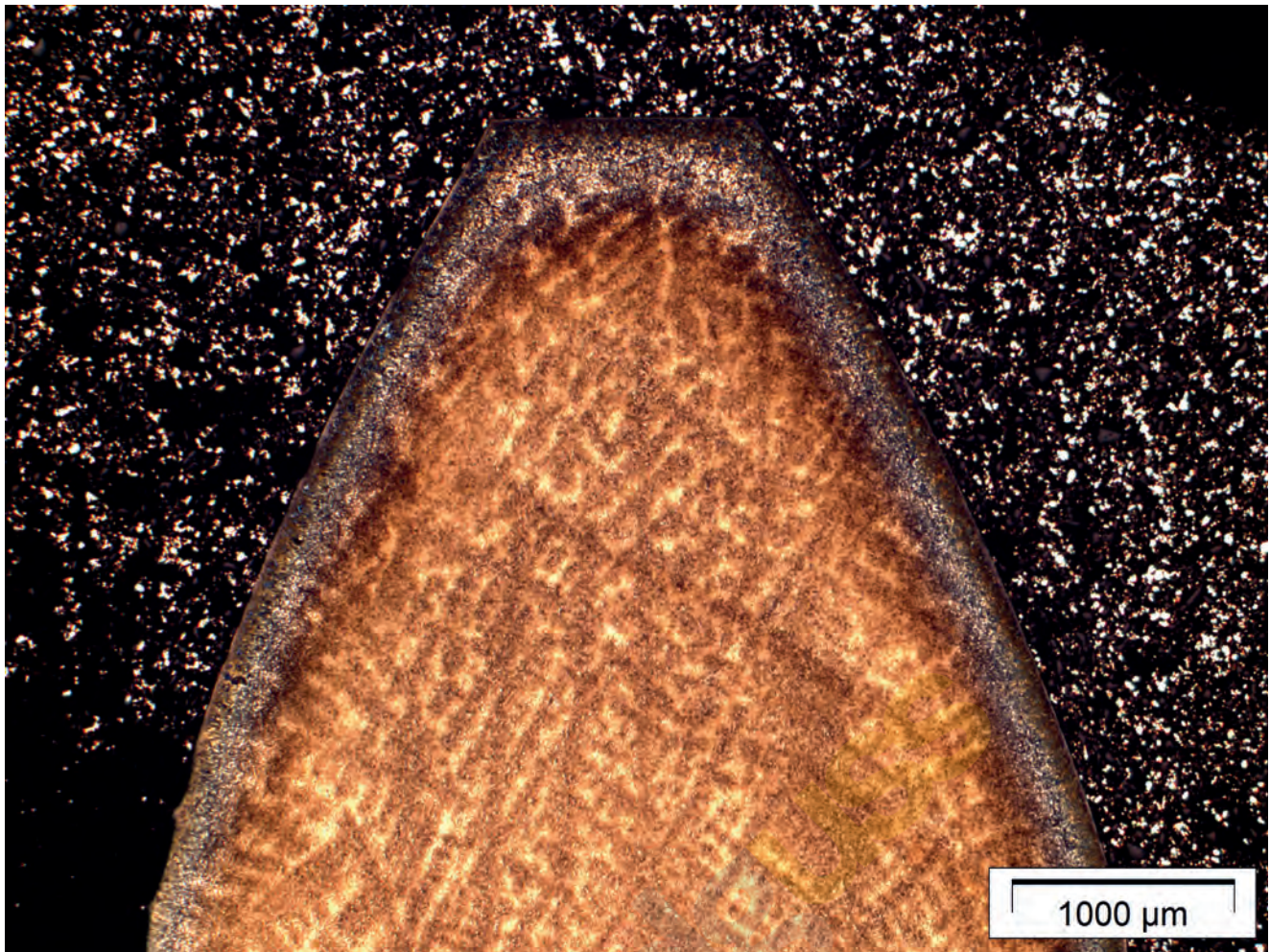


FOTOS: FORSCHUNGSVERBUND MASSIVER LEICHTBAU



1000 µm

Lichtoptische Aufnahme eines carbonitrierten Zahnradzahns.

# Stofflicher Leichtbau durch optimierte Werkstoff-Prozess-Kombination

VON CLEMENS NEIPP, AACHEN, HOLGER SURM, BREMEN UND CHRISTIAN WEBER, MÜNCHEN

Die steigenden Anforderungen im Pkw-Bereich an Sicherheit, Komfort und Fahrleistung haben in den vergangenen Jahren zu einer kontinuierlichen Zunahme des Fahrzeuggewichts geführt. Damit eine weitere Entwicklung im Bereich der Fahrdynamik bei gleichzeitiger Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Verbrauch erzielt werden kann, muss diesem Trend durch neue Leichtbauideen begegnet werden. Eine Vielzahl von Werkstoffentwicklungen wurden bisher für den Karosserieleichtbau durchgeführt und erfolgreich großtechnisch umgesetzt, wogegen

es im Antriebsstrang zu keiner vergleichbaren Gewichtseinsparung gekommen ist. Hier setzte das Projekt „Leichtbaustähle höherer Beanspruchbarkeit“ des Forschungsverbunds Massiver Leichtbau ([www.massiverleichtbau.de](http://www.massiverleichtbau.de)) an, mit dem Ziel, Gewichtseinsparungen über den stofflichen Leichtbau zu realisieren.

## Motivation

Ziel der hier beschriebenen Arbeiten war es, Leichtbau von massiv umgeformten Bauteilen im Antriebsstrang durch neu entwickelte und optimierte Werkstoffe sowie eine zielgerichtet darauf angepasste Werkstoffbehandlung zu ermöglichen. Als wesentlicher Gewichtstreiber im Antriebs-

strang gilt das Getriebe, dessen Zahnräder wegen der hohen Belastungen in der Regel einsatzgehärtet werden. Die durch solche thermochemischen Wärmebehandlungen erzielbaren Eigenschaftsprofile rand-schichtgehärteter Bauteile sind in einem breiten Rahmen an die betriebsspezifischen Anforderungen anpassbar und bieten sich damit an, durch eine Abstimmung von Werkstoffauswahl, Verfahrensvariante und Prozessparametern die Leistungsdichte noch weiter zu steigern. Damit finden sich die Inhalte des Projekts in der Schnittmenge von Werkstoff- und Prozessdesign (Bild 1).

Das hier genutzte Wärmebehandlungsverfahren Carbonitrieren, eine Verfahrensvariante des Einsatzhärtens, bei dem zu-

sätzlich zum Kohlenstoff noch Stickstoff in die Randschicht eingebracht wird, wurde in der jüngeren Vergangenheit in der Regel auf klassische Einsatzstähle angewendet [1]. Dabei konnte bei den so behandelten Zahnrädern eine signifikante Steigerung der Zahnflanken- und Zahnfußtragfähigkeit ( $\sigma_{Hlim}$  und  $\sigma_{Flim}$ ) erzielt werden [2]. Weiteres Potenzial zur Eigenschaftsverbesserung wird in der Entwicklung von neuen Legierungskonzepten gesehen, die speziell auf ein optimiertes Ausscheidungsverhalten von Carbonitriden bei dieser Wärmebehandlung abgestimmt sind. In erster Linie kommen in diesem Fall die Elemente Aluminium, Niob, Vanadium und Bor in Betracht, die die Kinetik der Ausscheidungsbildung bei Carbonitrierstählen und damit die resultierende Mikrostruktur und die mechanischen Eigenschaften positiv beeinflussen sollen.

### Vorgehen

Am Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen (IEHK) wurden mehrere auf die Wärmebehandlung angepasste Werkstoffkonzepte entwickelt, von denen zwei für die weiteren Untersuchungen erschmolzen, abgegossen und umgeformt wurden. Die chemische Zusammensetzung der beiden Legierungen orientiert sich am großtechnisch etablierten Einsatzstahl 18CrNiMo7-6, der durch Zugabe von 0,1 Gew.-% Vanadium und 0,03 Gew.-% Niob an die Wärmebehandlung Carbonitrieren angepasst wurde. Bei der zweiten Variante wurden zusätzlich 30 ppm Bor zulegiert. Augenmerk lag dabei auf der Kontrolle des Austenitkornwachstums während des Carbonitrierens, der anschließenden Direkthärtung und damit der resultierenden Martensitstrukturen sowie auf der Bildung von festigkeitssteigernden Nitriden in der Randschicht.

Das Material wurde anschließend für die weiteren Untersuchungen dem gesamten Forschungsverbund zur Verfügung gestellt. Für die eigenen Untersuchungen wurden an der Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau der TU München Pulsatorräder für die Zahnfußprüfung sowie Laufprüfräder und -ritzel für die Zahnflankenprüfung gefertigt. Die Zahnräder wurden am Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien carbonitriert, wobei die Parameter C- und N-Gehalt in der Randschicht, Direkthärte- und Anlasstemperatur variiert wurden, um unterschiedliche Gefüge- und Ausscheidungszustände zu erzeugen. Der schematische Verlauf der Wärmebehandlung ist in Bild 2 dargestellt.

## KURZFASSUNG:

Durch eine gezielte Abstimmung von bereits etablierten Stählen und Wärmebehandlungen hinsichtlich der Legierung und der Prozessparameter lassen sich signifikante Leichtbaupotenziale realisieren. Mit einem mikrolegierten und carbonitrierten 18CrNiMo7-6 lassen sich im Vergleich zum üblicherweise verbauten 16MnCr5 einsatzgehärtet deutliche Gewichtseinsparungen beispielsweise im Kfz-Antriebsstrang erreichen und damit CO<sub>2</sub>-Emissionen senken.

Das Vorhaben „Leichtbaustähle höherer Beanspruchbarkeit“ gehörte zu den drei besten Projekten der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) 2019. Damit durften sich die Projektpartner mit ihrer erfolgreichen Forschung zu den Finalisten bei der Preisverleihung des Otto von Guericke-Preises am 14.11.2019 in Berlin zählen.

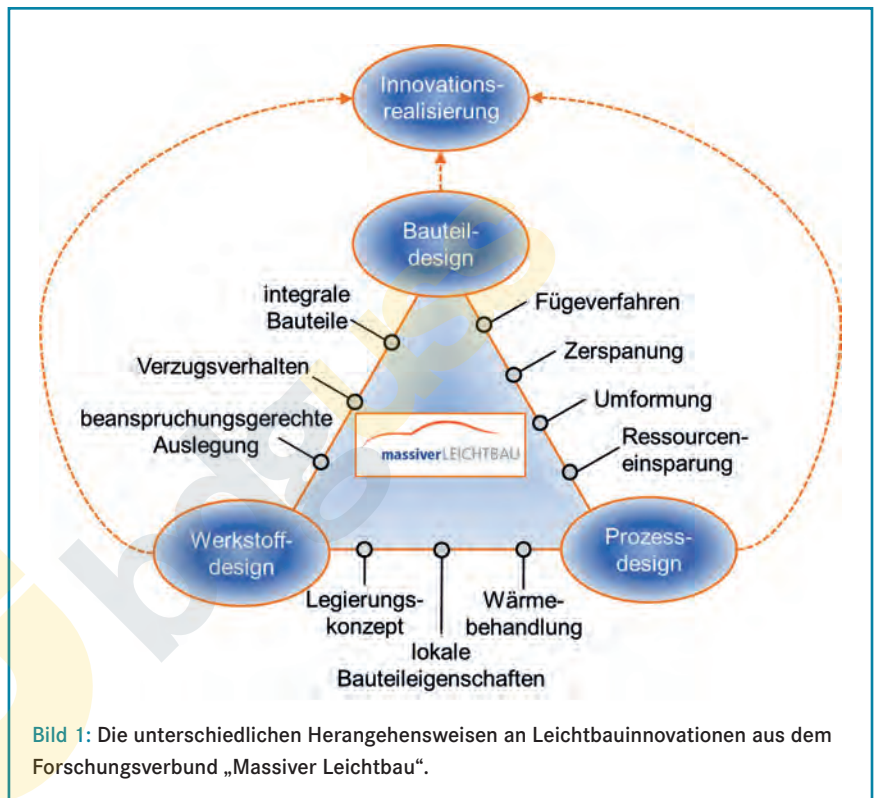


Bild 1: Die unterschiedlichen Herangehensweisen an Leichtbauinnovationen aus dem Forschungsverbund „Massiver Leichtbau“.

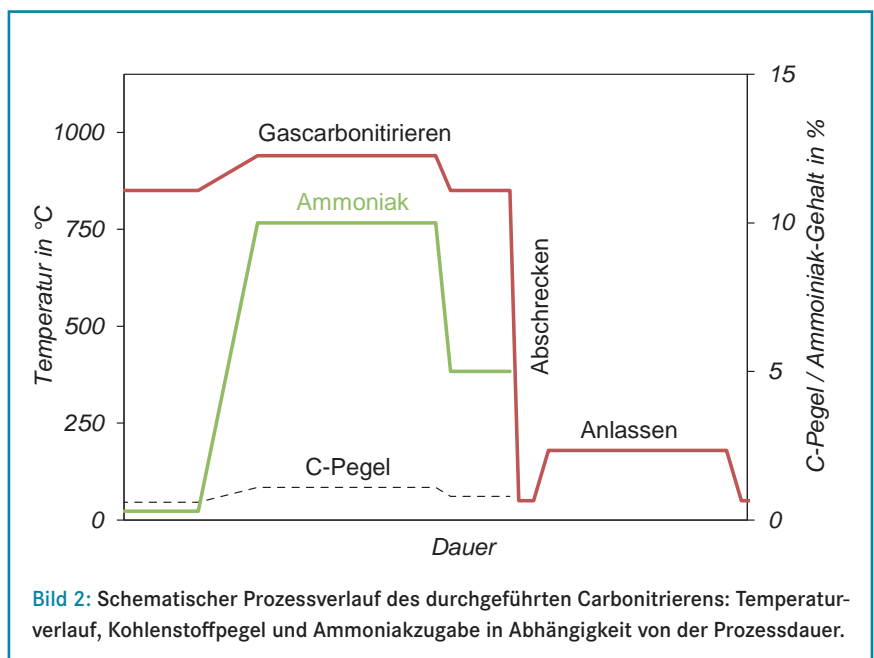


Bild 2: Schematischer Prozessverlauf des durchgeführten Carbonitrierens: Temperaturverlauf, Kohlenstoffpegel und Ammoniakzugabe in Abhängigkeit von der Prozessdauer.



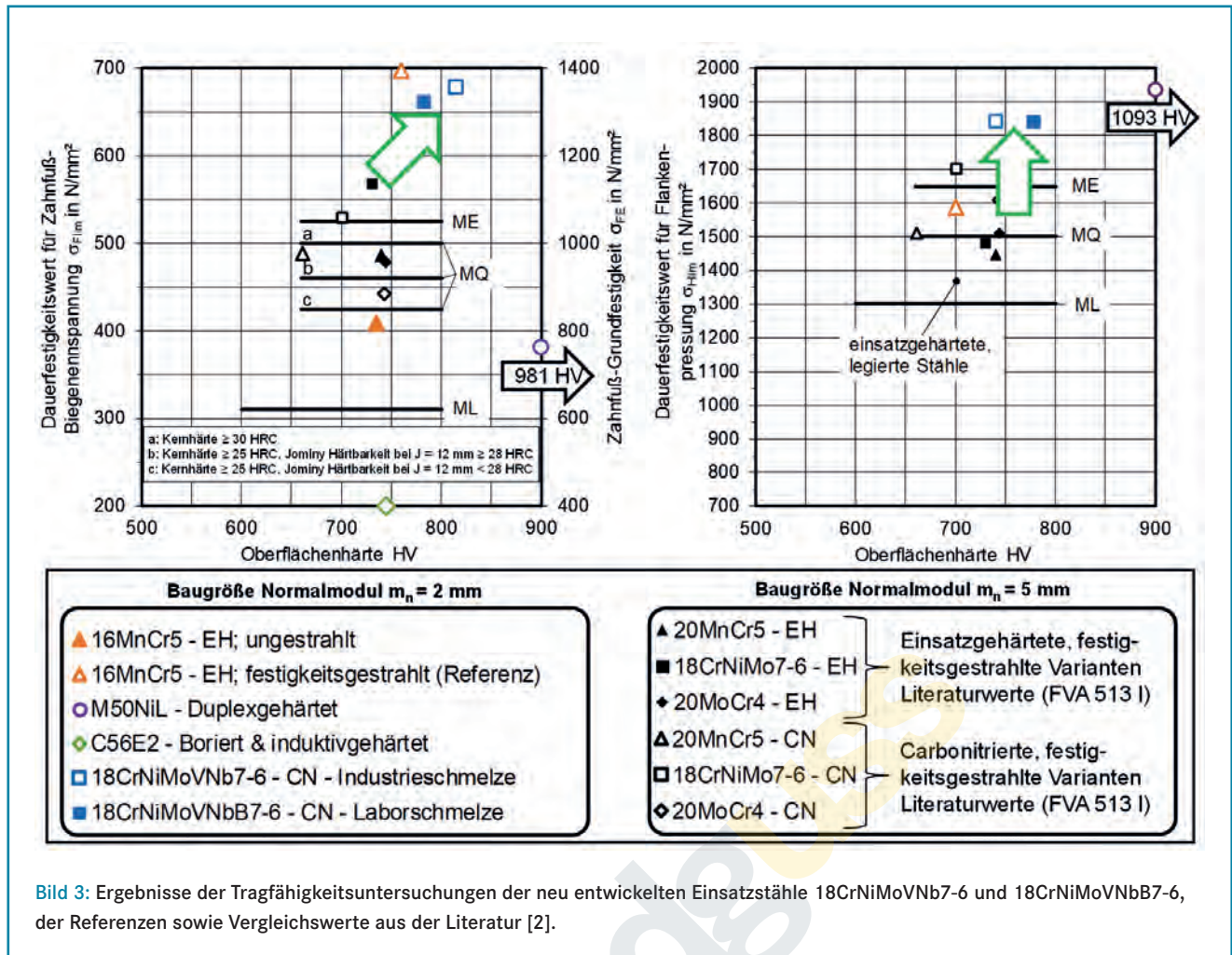


Bild 3: Ergebnisse der Tragfähigkeitsuntersuchungen der neu entwickelten Einsatzstähle 18CrNiMoVNb7-6 und 18CrNiMoVNB7-6, der Referenzen sowie Vergleichswerte aus der Literatur [2].

Die anschließenden Untersuchungen der thermochemisch behandelten Randschicht konzentrierten sich auf die chemische Zusammensetzung, die Mikrostruktur, bestehend aus Matrix und Ausscheidungen, sowie die Tragfähigkeitsprüfungen der Zahnflanke [3] und des Zahnfußes [4], aus denen sich die Dauerfestigkeitswerte  $\sigma_{Hlim}$  und  $\sigma_{Flim}$  berechnen lassen. Mithilfe dieser beiden Werte lassen sich die Werkstoff-Prozess-Kombinationen mit den industriellen Standards vergleichen und das Leichtbaupotenzial im Vergleich zu einer Referenz berechnen.

Neben den oben beschriebenen neu entwickelten Einsatzstählen wurden weitere Werkstoff-Prozess-Kombinationen geprüft, die als Vergleichswerte herangezogen wurden. Als Referenz wird der bisher verbaute 16MnCr5 im einsatzgehärteten Zustand herangezogen, ein C56E2 boriert und induktionsgehärtet, sowie ein M50NiL duplexgehärtet und plasmanitriert. Weitere Literaturwerte zu einsatzgehärteten und carbonitrierten Einsatzstählen wurden aus dem Forschungsprojekt FVA 513 I (Carbozahn) [2] übernommen.

### Ergebnisse

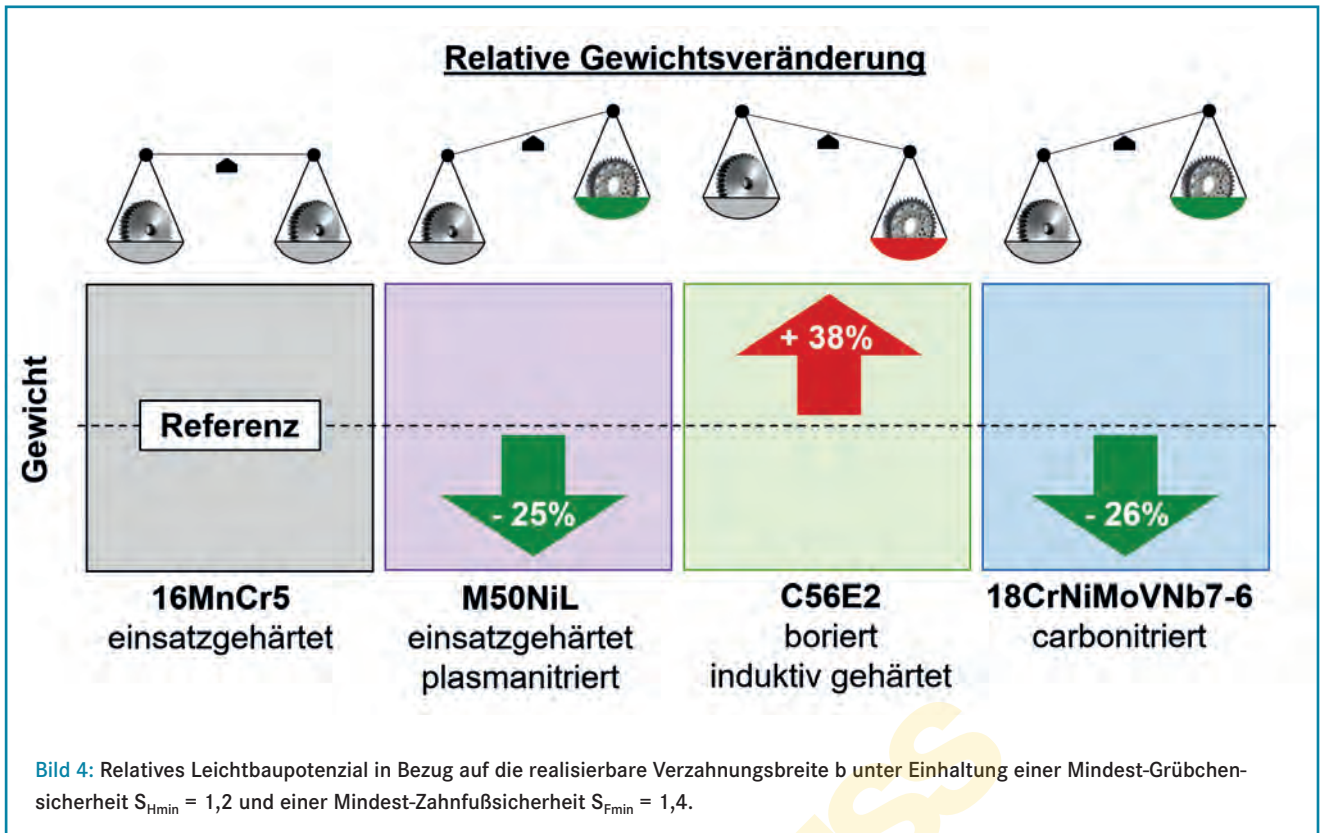
Durch die gezielte Abstimmung zwischen der Legierung der neu entwickelten Einsatzstähle 18CrNiMoVNb7-6 und 18CrNiMoVNB7-6 und der Wärmebehandlung aus Carbonitrieren mit Direkt härten ist es gelungen, in den Randschichten der Zahnräder ein Gefüge aus angelassenem Martensit, Restaustenit und Nitridausscheidungen zu erzeugen. Durch den hohen Anteil an Ausscheidungen konnte der festigkeitssenkende Effekt des Restaustenits auf die Oberflächenhärten der Zahnflanke und des Zahnfußes, allgemein als Qualitätsmangel bewertet, ausgeglichen werden und diese liegen nun über dem Niveau eines einsatzgehärteten Stahls 18CrNiMo7-6. Gleiches gilt für den Einfluss des Carbonitrierens auf den Dauerfestigkeitswert der Zahnfuß-Biegezugspannung  $\sigma_{Flim}$ , der durch die Mikrolegierung und Ausscheidungsbildung umgekehrt werden konnte. Gleichzeitig wurde der Dauerfestigkeitswert für die Flankenpressung  $\sigma_{Hlim}$  noch einmal gesteigert. Die Ergebnisse der mechanischen Prüfung sind in Bild 3 in die Vergleichsfelder der DIN-Normen-

reihe 3990 eingetragen, um sie mit Literaturwerten und Industriestandards vergleichen zu können.

Für die Abschätzung des Leichtbaupotenzials ist vor allem der Dauerfestigkeitswert der Flankenpressung  $\sigma_{Hlim}$  von Relevanz. Durch den Vergleich der verschiedenen Varianten mit der Referenz wird der relative Breitenfaktor  $b_{rel}$  berechnet, mit dem eine Gewichtseinsparung abgeschätzt werden kann. Als Referenz wurde ein 16MnCr5 einsatzgehärtet herangezogen.

### Fazit und Ausblick

Mithilfe der berechneten Dauerfestigkeitswerte der Flankenpressung  $\sigma_{Hlim}$  lassen sich die relativen Breitenfaktoren  $b_{rel}$  und damit, unter Berücksichtigung der Sicherheitsbeiwerte und der konstruktiven Vorgaben, die Leichtbaupotenziale im Vergleich zum Referenzstahl 16MnCr5 einsatzgehärtet abschätzen. So ergibt sich für die neuen Einsatzstähle eine Gewichtseinsparung von bis zu 26 %, für den hochlegierten und aufwendig wärmebehandelten M50NiL bis zu 25 % und bei Nutzung des C56E2 müssten die Zahn-



räder bei gleicher Belastung circa 38,5 % schwerer ausgelegt werden. **Bild 4** fasst die Ergebnisse grafisch zusammen.

Mit diesen Ergebnissen konnte gezeigt werden, dass bereits etablierte Werkstoffe durch geringfügige Anpassungen hinsichtlich Legierung und Wärmebehandlung noch signifikante Leichtbaupotenziale besitzen. Vor allem für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) ist dies interessant, da die Fertigungsprozesse nur geringfügig angepasst werden müssen und die Anlageninvestitionen niedrig gehalten werden. Für den Kfz- und Maschinenbau ergibt sich die Möglichkeit, Bauteile in Antriebssträngen leichter auszuliegen und dadurch ein sekundäres Leichtbaupotenzial, durch kleinere Motoren etwa, zu realisieren, wodurch der Einsatz der neuen Werkstoff-Prozess-Kombination noch attraktiver wird.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben „Entwicklung von höchstfesten Stählen für alternative Wärmebehandlungen und für die Kaltmassivumformung von Bauteilen im Kfz-Antriebs-

strang“ (IGF-Nr. 24 LN) der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) und Leittechnologie-Initiative des Forschungsverbundes „Massiver Leichtbau“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages gefördert, wofür die Projektpartner ihren Dank aussprechen. Die Langfassung des Abschlussberichts kann bei der FOSTA, Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf angefordert werden.

Clemens Neipp M.Sc., Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen, Dr.-Ing. Holger Surm, Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien Bremen, Christian Weber M.Sc., Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau der TU München.

**Literatur:**

[1] Spur, G. und H.-W. Zoch, Hg. Handbuch Wärmebehandeln und Beschichten. München: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2015. ISBN 978-3446427792.

[2] Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. Carbozahn. Carbonitrieren von verzahnten Getriebebauteilen. Forschungsvorhaben Nr. 513 I. Frankfurt/M., 18. März 2011. FVA-Heft.

[3] Deutsches Institut für Normung e. V. 3990-2, Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern - Berechnung der Grübchen-tragfähigkeit. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

[4] Deutsches Institut für Normung e. V. 3990-3, Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern - Berechnung der Zahnfuß-tragfähigkeit. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

**I R O P A**  
ELEKTROTECHNIK

Automatisierungstechnik  
Datentechnik Systemsoftware

Kompetenz seit mehr als 45 Jahren

---

Automatisierungstechnik für Gießereien und Maschinenbau  
Umstellung von Siemens S5 -> S7 / TIA  
Anlagensvisualisierung  
Stördatenerfassung und Auswertung, BDE, SQL-Datenbanken

---

IROPA Elektrotechnik GmbH  
Bergiusstr. 2a  
D-46244 Bottrop

Tel. +49 (0) 2045/89 07 0  
Fax. +49 (0) 2045/89 07 77

eMail info@iropa.de  
www.iropa.de